



응축모델을 활용한 열압축기 내 다상유동해석

MULTI-PHASE FLOW COMPUTATIONS ON FLOW FIELDS AROUND TVC USING NUCLEATION MODEL

저자 (Authors)	민대호, 김형준, 이훈, 이채수, 김종암 Daeho Min, Hyeongjun Kim, Hoon Lee, Chaesoo Lee, Chongam Kim
출처 (Source)	한국전산유체공학회 학술대회논문집 , 2016.7, 61-62 (2 pages)
발행처 (Publisher)	한국전산유체공학회 Korean Society of Computational Fluids Engineering
URL	http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE06717150
APA Style	민대호, 김형준, 이훈, 이채수, 김종암 (2016). 응축모델을 활용한 열압축기 내 다상유동해석. 한국전산유체공학회 학술대회논문집, 61-62.
이용정보 (Accessed)	서울대학교 147.46.118.*** 2017/04/28 12:02 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.



응축모델을 활용한 열압축기 내 다상유동해석

민 대 호¹, 김 형 준¹, 이 훈², 이 채 수², 김 종 암^{1*}

MULTI-PHASE FLOW COMPUTATIONS ON FLOW FIELDS AROUND TVC USING NUCLEATION MODEL

Daeho Min, Hyeongjun Kim, Hoon Lee, Chaesoo Lee, and Chongam Kim

1. 서 론

물 부족 현상이 만연한 오늘 날, 담수화 기술은 최근 여러 국가에서 중요한 이슈 중 하나로 여겨지고 있다. 이와 관련하여 많은 담수화 공장이 설치되었는데 대다수는 MSF(Multi Stage Flashing) 기법을 사용하고 있다. 이 기법은 대용량 담수화에는 유리한 이점이 있지만 효율면에서는 그다지 우수하지 못하고, 최근에는 이러한 단점을 극복하기 위해 열압축기(Thermal Vapor Compressor)를 사용한 MED(Multi Effect Distiller)가 새로운 대안으로 제시되고 있다.

MED 설비에서 TVC는 motive nozzle에서 분사되는 고온 고압의 초음속 유동을 통해 담수화 unit에서 사용했던 steam을 빨아들여 다시 재압축시키는 역할을 한다. 그러므로 두 steam의 질량 유량비인 entrainment ratio는 열압축기 성능을 평가하는 주요한 파라미터로 정의되며 이를 정확히 계산하는 선행 연구는 설비 설계에 필수적이다. 그러나 primitive nozzle steam으로 인해 발생하는 shock train이나 expansion-fan과 shear layer 사이의 상호작용, 그리고 상 변화 과정 등 복잡한 물리 현상은 수치해석의 정확성을 보장하기 어렵게 하고 있다.

본 연구에서는 전술한 열압축기 내부의 상 변화 유동에 대한 수치해석을 목표로 하고 있다. 충격파 및 팽창파의 강건하고 정확한 계산을 위해 AUSMPW+ 공간차분기법[1]을 사용했고, cell-by-cell AMR을 적용하여 공간정확도를 향상시켰다. 증기와 물에 대한 상태방정식으로는 학계에서 표준으로 인정되고 있는 IAPWS-97 formulation[2]을 사용하였다. 상 변화 과정은 Hertz-Knudsen equation을 기반으로 한 모델과 응축

모델 2가지를 사용하여 해석하고 두 결과를 서로 비교하였다.

2. 본 론

2.1 지배방정식

본 연구에서 사용한 지배방정식은 homogeneous mixture model을 기반으로 한 N-S equation으로써 기체상과 액체상의 구분은 질량비를 사용하고 있다. 또한 상태방정식으로 사용한 IAPWS-97 formulation은 각 물성치를 압력과 온도의 함수로 계산하기 때문에 지배방정식을 conservative form에서 primitive form으로 전환하였다. 그러므로 지배방정식은 다음과 같이 요약할 수 있다.

$$\frac{\Gamma_e}{J} \frac{\partial Q_p}{\partial \tau} + \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \eta} = D + S_{phase} \quad (1)$$

여기에서 Γ_e 는 지배방정식을 primitive form으로 표현하기 위한 conversion matrix이고, Q_p 는 primitive variable, D 는 점성 플럭스이며 S_{phase} 는 상 변화 모델링을 통해 표현된 source term이다.

혼합류의 밀도는 Amagat's law를 통해 식 (3)과 같이 표현되며 엔탈피는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{1 - Y_1}{\rho_l} + \frac{Y_1}{\rho_v} \quad (2)$$

$$h_m = h_v Y_1 + (1 - Y_1) h_l \quad (3)$$

Y_1 는 두 상을 구분하기 위한 질량비이다.

2.2 상 변화 모델링

본 연구에서는 두 종류의 상 변화 모델링을 각각 적용하여 계산 후 결과를 서로 비교하였다. 첫 번째 모델링은 공동 유동이나 열에 의한 증발문제에서 많이 사용되는

1 정회원, 서울대학교 항공우주공학과

2 두산중공업 기술연구원 열유체 연구팀

* TEL : 02) 880-1915

* Corresponding author E-mail: chongam@snu.ac.kr



Hertz-Knudsen equation을 기반으로 한 모델이고, 구 번째 모델링은 액적이 응축되는 유동이나 증기 터빈에서 많이 사용되는 nucleation model이다. 두 모델 모두 특정조건 하에서 액체상의 생성비를 계산하는 방식을 취하고 있으나 nucleation model은 추가적으로 액적의 수를 고려하며, 이를 지배방정식에 추가적으로 고려해야 한다.

Hertz-Knudsen equation model은 포화압력과 국부압력의 차이에 비례하는 액적의 생성을 가정하며 식 (4)와 같이 표현된다.

$$S_{phase} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dot{m}_{evap} - \dot{m}_{cond}]^T / J \quad (4)$$

$$\text{where } \dot{m}_{evap} = C_{evap} \frac{\max(P_v - P, 0)}{\sqrt{2\pi RT}} \rho_l \alpha_l$$

$$\dot{m}_{cond} = C_{cond} \frac{\max(P - P_v, 0)}{\sqrt{2\pi RT}} \rho_v \alpha_v$$

반면 nucleation model은 droplet의 생성비 I 와 기존 droplet의 크기 변화율을 정의하여 상 변화과정을 모사한다.

$$S_{phase} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dot{m}_{nucleation} + \dot{m}_{growth} \rho_m]^T / J \quad (5)$$

$$\text{where } \dot{m}_{nucleation} = \frac{4}{3} \pi \rho_l \dot{r}^3, \dot{m}_{growth} = 4\pi \rho_l r^2 \eta \frac{\partial r}{\partial t}$$

위 식에서 r^* 는 Kelvin-Helmholtz critical radius, η 는 droplet의 개수를 나타내며 $\partial r / \partial t$ 는 droplet growth rate이다. 본 연구에서는 Hill *et al.*[3]에서 정의하고 있는 모델을 적용하였다.

2.3 수치해석 결과

본 연구에서 사용한 수치기법들은 NASA의 validation problem으로 널리 사용되고 있는 ejector nozzle problem과 Moore *et al.* 및 Moses and Stein의 응축유동실험을 통해 검증하였다. 이를 바탕으로 두산중공업에서 실험한 4종류의 TVC에 대해 이상기체가정을 통한 단상 유동해석과 본 연구에서 사용한 상 변화모델링을 활용한 다상 유동해석 결과를 비교하였다. 해석 결과 나타난 열압축기의 entrainment ratio는 표 1과 같이 정리되었다. 기존 많은 연구들은 TVC에 대해 단상 유동해석으로도 충분하다는 경우가 많은데 본 연구에서의 경우는 그렇지 못했다. 이는 단상 유동해석의 경우 충격파의 강도가 다상 유동해석의 경우보다 강하게 나타나게 되고, 이는 shock train의 길이를 단축시키면서 TVC를 설계작동모드인 double-choked mode에서 벗어나 single-choked mode로 예측하게 하기 때문이다. 특히 단상유동해석의 경우 온도가 삼중점(273.15K) 이하로 예측하는 영역이 넓게 분포하는 등 비물리적인 결과를 보이기도 한다(Fig.1). 그러나 본 연구에서의 다상유동해석 결과는 충격파의 강도를 정확하게 모사할 수 있기 때문에 상대적으로 더 정확한 결과를 도출할 수 있었다.

Table. 1 Entrainment ratio 계산 결과 비교

구 분	E.R error(%)		
	Ideal gas	Hertz-Knudsen	Nucleation
Configure 1	47.1%	6.96%	9.97%
Configure 2	46.8%	3.23%	6.83%
Configure 3	7.03%	2.6%	5.38%
Configure 4	61.9%	4.0%	5.67%

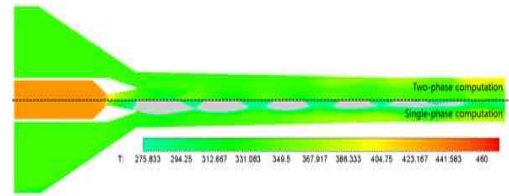


Fig. 1 Comparison of temperature contour between single and multi-phase flow analysis

3. 결 론

본 연구에서는 증기를 작동유체로 다루는 TVC에 대한 수치해석을 다뤘다. TVC의 성능을 정확하게 예측하기 위해서는 shock train에 대한 정확한 계산이 선결되어야 하나 단상 유동해석은 이를 만족하기 어렵다. 그러나 본 연구에서 다상 상 변화모델링을 적용한 다상 유동해석결과는 이를 정확히 예측할 수 있기 있으며, 그러므로 다상 유동해석방법을 통한 접근은 열압축기 해석에 필수적이라 할 수 있다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 우주핵심기술개발사업(NRF-2014 M1A3A3A02034856) 및 국방과학연구소의 국방 특화 연구실(UD150047JD, 지능 기반 무인기 제어)의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 2014, Hyeonjun Kim, Daeho Min and C.Kim, "Numerical investigations of flows around turbopump inducer in cryogenic cavitating conditions" ICCFD8, Cheongdu, China
- [2] IAPWS, The International Association for the Properties of Water and Steam, Revised release on formulation 1997
- [3] 1966, P.G.Hill, "Condensation of water vapour during supersonic expansion in nozzles", Journal of Fluid Mechanics 25(03), pp.593-620